

УДК 541.13

ПРОБОЙ ГАЗОВОГО ПРОМЕЖУТКА В ПОВЕРХНОСТНОМ БАРЬЕРНОМ РАЗРЯДЕ

И.С. Ткаченко, В.И. Гибалов, В.В. Лунин

(кафедра физической химии; e-mail: tcorporation@narod.ru)

С помощью численного моделирования исследованы процессы, происходящие в скользящем барьерном разряде в кислороде атмосферного давления. При моделировании предполагалось существование локального равновесия, и расчет динамики заряженных частиц в газовом промежутке проводили с помощью уравнений неразрывности. Конфигурацию электрического поля в разрядной зоне определяли интегрированием уравнения Пуассона. Обнаружено, что пробой газовой полости определяется фотопроцессами на поверхности катода. Появление и развитие канала микроразряда поддерживалось катодным слоем, который формировался у проводящего катода. Параметры катодного слоя, полученного в кислороде нормального давления, практически не отличались от распределений в нормальном катодном слое тлеющего разряда.

Введение

Барьерный разряд любых конфигураций – уникальный плазмохимический реактор, позволяющий сравнительно просто реализовать в промышленных масштабах неравновесный химический синтез, в том числе и синтез озона [1]. Достаточно интенсивно изучали динамику процессов в барьерном разряде объемной и компланарной геометрий [2–4]. Так называемый скользящий барьерный разряд был мало изучен. Исследования быстрых процессов над поверхностью диэлектрика [5–7] оставили ряд вопросов. Настоящая работа посвящена получению последовательных и максимально подробных данных о динамике процессов в барьерном разряде поверхностной геометрии, в том числе о кинетике синтеза озона.

Постановка задачи

Барьерный разряд возникает на поверхности диэлектрика разрядной ячейки, когда к высоковольтным

электродам прикладывается высокое напряжение (рис. 1). Высоковольтные электроды могут иметь разную форму, их может быть любое количество. Разряд в такой системе развивается нормально к поверхности электродов, вдоль поверхности диэлектрика в виде тонких разрядных каналов – микроразрядов (рис. 2). Длина этих каналов зависит от приложенного напряжения, а толщина практически постоянна и составляет ~100 мк [2].

Поверхностный разряд исследовали экспериментально и теоретически [5–7]. В данной работе представлены результаты численного исследования поверхностного барьерного разряда в кислороде при атмосферном давлении. Численное моделирование разряда проводили в двумерном приближении в предположении существования локального равновесия. Система координат приведена на рис. 1.

Динамика заряженных и нейтральных частиц в разрядной зоне описывается системой уравнений Больцмана. В условиях существования локального равновесия уравнения Больцмана преобразуются в систему уравнений неразрывности:

$$\frac{n_i}{t} \operatorname{div}(\bar{j}_i) = S_i, \quad (1)$$

$$\bar{j}_i = D_i \operatorname{grad}(n_i) - \bar{V}_i n_i, \quad (2)$$

где $n_i, \bar{j}_i, D_i, S_i, \bar{V}_i$ – плотность заряженных частиц, плотность тока, коэффициент диффузии и источник, а также скорость i -й частицы. Под источником для каждой заряженной частицы понимаются интегралы, описывающие процессы ионизации, прилипания и отлипания частиц, а также их диссоциации. Математи-

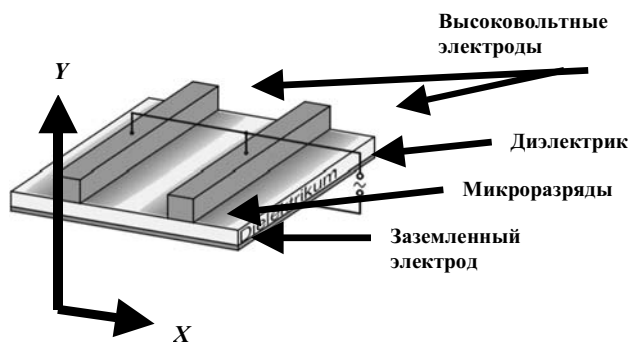


Рис. 1. Разрядная ячейка поверхностного барьерного разряда

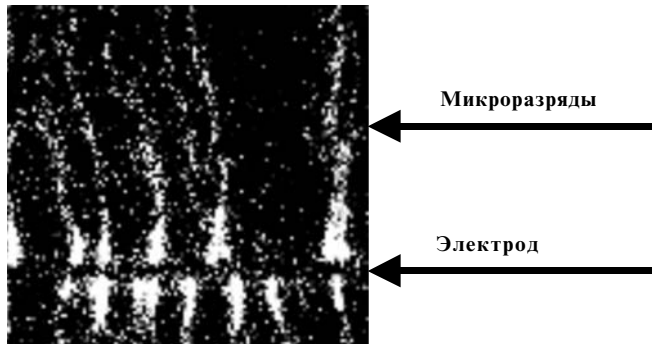


Рис. 2. Фотография поверхностного барьерного разряда [5]

ческая модель включает электроны, положительные и отрицательные ионы. Рассмотрены два типа отрицательных ионов – атомарный и молекулярный кислород.

Для решения системы уравнений (1) и (2) были определены граничные и начальные условия. В соответствии с моделью разрядной ячейки существуют два типа границ: реальные (поверхность электрода и диэлектрика) и виртуальные (внешняя граница разрядной области в газе). Поверхности диэлектрика и электрода рассматривали как источники вторичных электронов, появляющихся благодаря фото- и ионной эмиссии. Связь между плотностью вторичных электронов и потоком ионов и фотонов на поверхность устанавливалась соотношением (3):

$$n_e \cdot V_e = \gamma_+ \cdot n_+ \cdot V_+ + \gamma_{ph} \cdot \phi, \quad (3)$$

где γ_+ – коэффициент вторичной эмиссии электронов, появляющихся в результате бомбардировки поверхности положительными ионами, γ_{ph} – коэффициент электронной фотоэмиссии с катода, V_+ , V_e – модули скорости положительных ионов и электронов соответственно. Плотность потока фотонов ϕ на поверхности катода считалась пропорциональной скорости ионизации в разрядном объеме и определялась интегрированием по всей разрядной области. Предполагалось, что все частицы, достигшие поверхности проводящего высоковольтного электрода, вводились в область разряда. Все частицы, достигшие диэлектрической поверхности, оседали на ней, а заряд этих частиц учитывали при расчете электрического поля. Частицы, достигшие внешних границ разрядной области, могли покинуть область интегрирования.

В качестве начальных принимались следующие условия:

- 1) плотность заряженных частиц в газе считалась равной нулю;
- 2) начальная плотность заряда на поверхности диэлектрика определялась предыдущим разрядом.

Для коррекции эффекта клеточной диффузии при расчете динамики заряженных частиц использовали FCT-метод [8]. Для определения конфигурации электрического поля в разрядной области рассматривали две области интегрирования: диэлектрик и газ, отличающиеся величиной диэлектрической постоянной. Для каждой из областей решали уравнение Пуассона:

$$\operatorname{div}(\vec{E}) = \frac{1}{\epsilon_0 \cdot \epsilon_i} \cdot \rho_i. \quad (4)$$

На границе диэлектрик–газ эти решения объединялись известными соотношениями между нормальной и тангенциальной составляющими напряженности электрического поля с учетом заряда, осевшего на поверхность диэлектрика.

Распределение потенциала на открытых границах области интегрирования определяли интегрированием распределений заряда на поверхности электрода и диэлектрика, а также в разрядной области газа. Распределение заряда на поверхности электрода определяли из условий эквипотенциальности поверхности электрода [3].

Расчеты проводили в кислороде атмосферного давления; использованный диэлектрик имел величину относительной диэлектрической постоянной 8,4 и толщину 2 мм; высоковольтный электрод представлял собой в сечении квадрат со стороной 3 мм. Результаты, представленные ниже, относятся к моделированию динамики разрядных процессов поверхностного барьерного разряда при приложении постоянного, отрицательного напряжения на электрод.

Начальная стадия разряда и формирование катодного слоя

Результаты расчетов напряженности поля перед пробоем разрядного промежутка приведены на рис. 3. Условия пробоя газа наблюдаются вблизи угла, образованного поверхностью электрода и диэлектрика. В этой области, характерный размер которой составляет несколько десятков микрон, появление электронов приводит к развитию разрядных процессов.

Появление затравочных электронов в разрядной зоне приводит к развитию таких процессов, которые завершаются пробоем газа вдоль поверхности диэлектрика [4]. Общее число начальных электронов не превышает нескольких тысяч. Между моментом появления начальных электронов в газе и собственно пробоем наблюдается определенная задержка, которая в зависимости от начального напряжения на электроде и количества электронов составляет несколько наносекунд. После задержки регистрируется

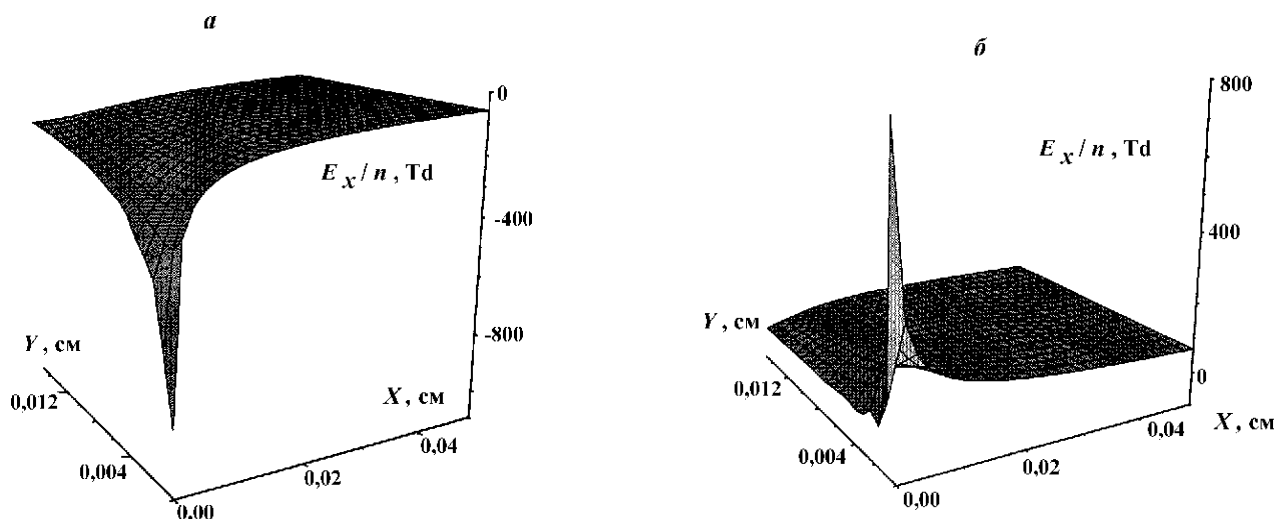


Рис. 3. Начальное распределение напряженности электрического поля: *a* – вдоль поверхности диэлектрика; *б* – нормально к поверхности диэлектрика

разрядный импульс тока (рис. 4). На этом же графике нанесены эмиссионные токи, вызванные фото- и ионными процессами на поверхности катода. Как видно, появлению основного разрядного тока предшествует значительный фототок. Передний фронт разрядного тока составляет всего несколько наносекунд, а его полная длительность достигает 20–25 нс.

Фотопроцессы играют определяющую роль в иницировании разрядных процессов. Исключение фотопроцессов из модели приводит к значительному (на порядок и более) затягиванию переднего фронта раз-

рядного тока, такому же увеличению его общей длительности и падению его амплитуды, что не соответствует экспериментальным данным [5, 6]. По мере нарастания разрядного тока роль фотопроцессов падает, в то же время появляется заметный эмиссионный ток, вызванный столкновениями положительных ионов с поверхностью катода.

Изменение значимости эмиссионных процессов, как и нарастание разрядного тока, связано с перестройкой конфигурации электрического поля вблизи катода (рис. 5). Прежде всего напряженность поля

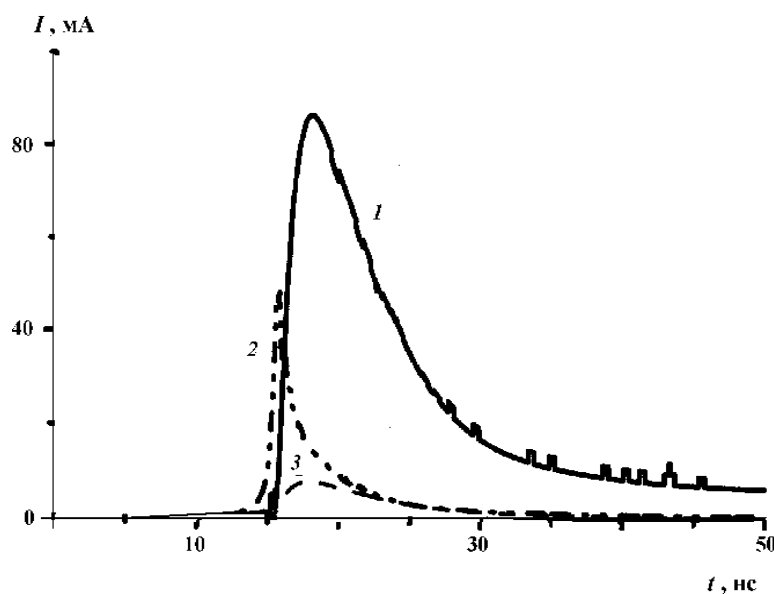
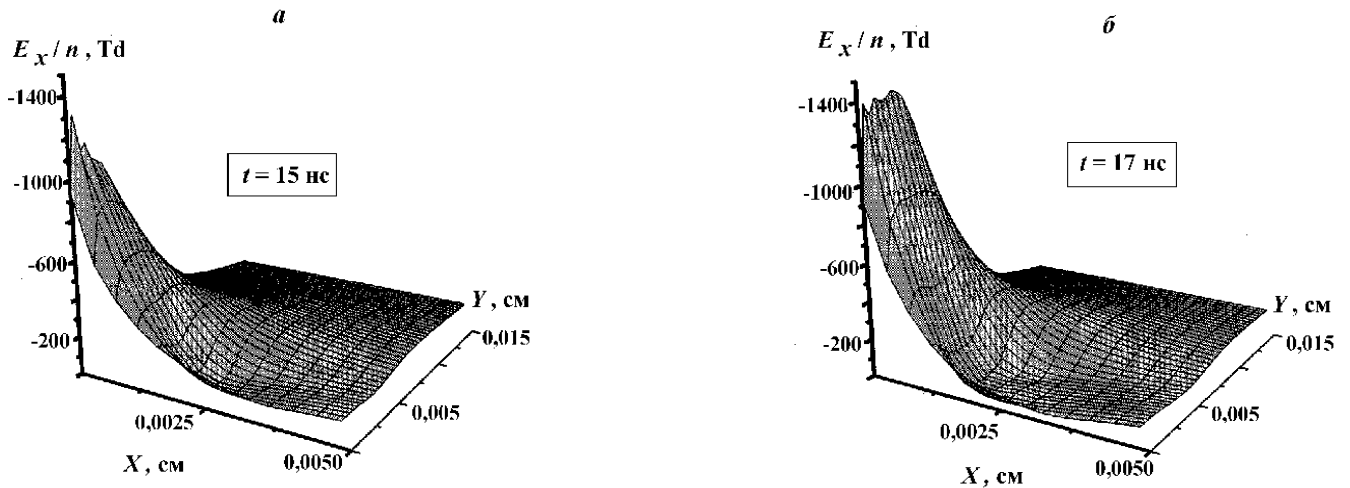
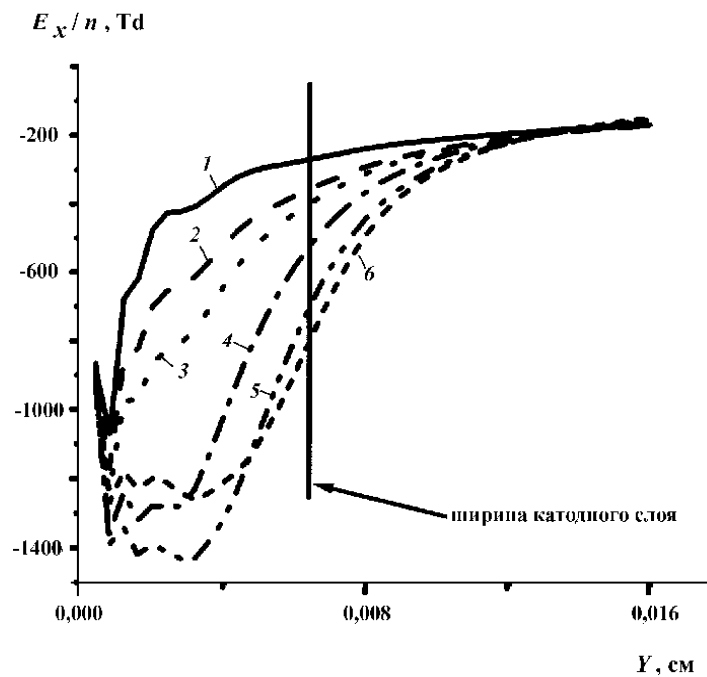


Рис. 4. Полный ток разряда (*1*), токи эмиссии, вызванные фотоэмиссией (*2*) и ионными процессами на поверхности катода (*3*)

Рис. 5. Формирование катодного слоя (t , нс): a – 15 ; b – 17Рис. 6. Уширение катодного пятна на поверхности катода (t , нс): 1 – 1; 2 – 15,2; 3 – 15,5; 4 – 16; 5 – 17; 6 – 18,8

вблизи катода увеличивается примерно на 30%, достигая величины порядка 1500 Td, что видно из сравнения рис. 3 и 5. Кроме того, продольная составляющая напряженности электрического поля “прижимается” к катоду. Одновременно с этим процессом наблюдается уширение области с высокой напряженностью поля вдоль поверхности катода – от поверхности диэлектрика к верхнему краю катода (рис. 6). Параметры катодного слоя поверхност-

ного барьерного разряда практически не отличаются от параметров нормального катодного слоя тлеющего разряда, т.е. за несколько наносекунд у катода формируется нормальный катодный слой. Изменение его поперечных размеров вдоль поверхности катода – процесс, известный как уширение катодного пятна.

Уширение происходит одновременно с развитием переднего фронта разрядного тока. Вблизи максимума тока наблюдается стабилизация поперечного размера

катодного пятна, размер которого достигает примерно 40–60 мк (рис. 6). Продольная толщина катодного слоя составляет примерно 20–30 мк. Плотность тока на внешней границе катодного слоя достигает 250 A/cm^2 . Все перечисленные параметры практически совпадают с параметрами нормального катодного слоя в кислороде при атмосферном давлении.

Выводы

В результате численного моделирования процессов в барьерном разряде поверхностной геометрии было установлено:

- 1) пробой газового промежутка начинается с резкого усиления фотопроцессов на поверхности катода;
- 2) увеличение вторичной эмиссии с поверхности электрода приводит к формированию катодного слоя; катодное пятно на поверхности проводящего электрода увеличивает свою площадь до тех пор, пока осевший на диэлектрическую поверхность заряд не останавливает этот процесс;
- 3) в развитом катодном слое роль фотопроцессов в дальнейшей динамике разряда уменьшается и замещается вторичной эмиссией электронов, вызванной ударами положительных ионов о поверхность катода.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Лунин В.В., Попович М.П., Ткаченко С.Н. // Физическая химия озона. М., 1998. С. 480.
2. Kogelschatz U. // IEEE Trans. Plasma Sci. 2002. **30**. P. 1400.
3. Gibalov V.I., Pietsch G.J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2000. **33**. P. 2618.
4. Gibalov V.I., Pietsch G.J. // J. Phys. D: Appl. Phys. 2005. **37**. P. 2093.
5. Saveliev A.B., Gibalov V.I., Pietsch G.J. // Proc. 14 ISPC. Prague, 1998. P. 2343.
6. Kozlov M.V., Sokolova M.V. et al. // Plasmas and Polymers. 2003. **8**. P. 179.
7. Humpert C., Pietsch G. J. // Ozone: Sci. Engineering. 2005. **27**. P. 59.
8. Book D.L., Boris J.P., Hain K.J. // Comput. Phys. 1975. **20**. P. 248.

Поступила в редакцию 12.06.06

SPARK-OVER OF GAS GAP ON THE SURFACE BARRIER DISCHARGE

I.S. Tkachenko, V.I. Gibalov, V.V. Lunin

(Division of Physical Chemistry)

The development of a discharge channel in barrier discharge with surface arrangements is investigated numerically. It is found that initial phase of discharge development is mainly determined by photoemission. The cathode layer, which appears at the negative electrode, becomes the source of secondary electrons caused by ion collisions with cathode surface. Parameters of the cathode layer are near to those of a normal glow discharge. The charge transfer as well as energy release and ozone production happens mainly in the conductive channel, which appears above the dielectric surface. It is found that specific energy consumption on ozone production is near the experimental value and is determined by field strength in the conductive channel, which is nearly constant and of about 70 to 100 Td.